

# ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТОРЦЕВОГО КОНТАКТНОГО УПЛОТНЕНИЯ МНОГОРЕЖИМНОЙ ТУРБОМАШИНЫ

Лежин Д.С.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Уплотнительные системы являются обязательным атрибутом большинства авиационных изделий. Несмотря на появление новых, перспективных типов уплотнений (например, гидростатических и гидродинамических, щеточных), в большинстве узлов авиационных и ракетных двигателей на сегодняшний день находят широкое применение уплотнения контактного типа, обладающие целым рядом преимуществ по сравнению с указанными выше. Представителями такого типа являются торцевые контактные уплотнения (ТКУ) и торцевые контактные уплотнения (РТКУ).

При создании уплотнений перед проектировщиками стоят две основные задачи:

1. Определение ресурса ТКУ;
2. Определение утечек через ТКУ в любой момент времени в течение ресурса.

В настоящее время при расчете торцевых контактных уплотнений учитываются такие факторы, как скорость скольжения контактирующих поверхностей, материалы этих поверхностей, перепады давлений между уплотнительными полостями, контактное давление. На основании этих "входных" параметров определяется величина износа контактирующей пары.

В процессе работы пары трения в силу действия ряда факторов возможны сложные формы контакта, отличные от расчетных. В связи с этим результаты расчета, полученные для идеализированной пары трения могут существенно отличаться от фактических. Существующие методики расчета торцевых контактных уплотнений не учитывают изменение положения контактирующих поверхностей друг относительно друга. Одним из факторов, оказывающих влияние на изменение формы зазора между уплотнительными кольцами, является учет поперечных сечений уплотнительных колец - как результат действующих на них силовых и тепловых нагрузок.

Деформации элементов уплотнительных систем могут оказывать влияние на гидродинамические характеристики в уплотнительной паре, следовательно, на величину утечек. Кроме того, постоянное изменение площади контакта уплотнительных поверхностей влечет за собой изменение скорости изнашивания, и, следовательно, ресурса

уплотнительной пары. В свою очередь, гидродинамические характеристики через распределение давления в зазоре оказывают влияние на величины деформаций колец. Для того, чтобы сделать количественную оценку влияния деформаций на характеристики конкретного уплотнения, необходимо произвести совместный учет деформаций рабочих поверхностей и изнашивания на различных режимах работы и сравнить полученные результаты с данными, полученными в результате расчета по существующим методикам.

Учет деформаций совместно с учетом изнашивания рабочих поверхностей вносит в методику определенную специфику, заключающуюся в том, что каждое состояние уплотнительной системы в произвольный момент времени является единственным и неповторимым, а, следовательно, зависит не только от времени, но и от предшествующего пути, по которому шло изменение состояния.

Для совместного учета деформаций и изнашивания уплотнительных колец была создана "виртуальная" модель имитирующая реальную работу пары трения.

Основные допущения, принятые в данной модели:

- ☐ Модель осесимметричная;
- ☐ Одно из колец ТКУ является абсолютно жестким и неизнашиваемым;
- ☐ Течение рабочего тела в щели изотермическое;
- ☐ Давление рабочего тела по толщине пленки не меняется;
- ☐ Массовые силы в пленке отсутствуют.

Данная модель реализована в виде программы, содержащей следующие отдельные, связанные между собой блоки:

1. **Блок исходных данных.** Все исходные данные можно подразделить на два типа:

Статические исходные данные – это геометрические характеристики поперечного сечения деформируемого кольца, моменты инерции сечения, физические характеристики материалов колец и рабочего тела.

Динамические исходные данные – это давление уплотняющей и уплотняемой рабочих сред, температура в зоне уплотнения, частота вращения подвижного кольца. Все эти данные изменяются во времени в зависимости от режима работы турбомшины, т.е. являются "привязанными" к обобщенному полетному циклу. В программе эти данные задаются в виде табличных параметрических зависимостей от времени.

Исходя из вышесказанного, блок исходных данных представляется в программе двумя модулями: модулем статических данных и модулем

динамических данных. Подобное разделение вызвано алгоритмом работы программы.

## 2. Блок геометрического моделирования.

Содержит собственно геометрическую модель уплотняющих поверхностей, а также модуль учета изнашивания. Геометрическая модель аналитически описывает в каждый момент времени форму изнашиваемого тела и его ориентацию относительно неизнашиваемого основания данных, полученных в результате расчета деформаций и принятой теории изнашивания. Более подробно геометрическая модель описана в [1].

Учет изнашивания в программе проводился по инженерной методике расчета износа деталей машин, составленной на базе отдельных испытаний образцов пар трения [2]. Согласно данной методике, учитывая, что согласно принятым допущениям одна из поверхностей является неизнашиваемой, для оценки износа дисковых поверхностей (именно к данному классу сопряжений по условиям изнашивания относится рассматриваемая пара трения) можно использовать следующие зависимости:

Скорость изнашивания материалов в условиях сухого и граничного трения (принимая линейный закон изнашивания):

$$\gamma = \frac{K \cdot F \cdot n}{r_2 - r_1},$$

где  $\gamma$  - скорость изнашивания

$K$  – интенсивность изнашивания материала;

$F$  – суммарная нормальная сила, нагружающая контактирующие поверхности;

$n$  – частота вращения подвижного кольца;

$r_1, r_2$  – минимальный и максимальный радиусы зоны контакта.

Основной характеристикой изнашивания детали является линейный износ, измеренный по нормали к поверхности трения. Для большинства расчетных случаев, в том числе и для данного, можно принять линейную зависимость между величиной износа  $U$  и временем изнашивания  $t$ . Тогда

$$\gamma = \frac{U}{t} = \text{const}$$

Ввиду принятого допущения о неизнашиваемости одной детали, износ другой по рабочей поверхности будет равномерным.

## 3. Блок расчета гидродинамических характеристик уплотнения. В блоке производится расчет

распределения давления рабочего тела в зазоре, а также расчет утечек. Из-за сложности оценки фазового состояния рабочего тела в зазоре (в случае, когда фазовые состояния уплотняемой и уплотняющей сред различны) расчет ведется параллельно для жидкости и для газа. Это дает возможность в дальнейшем, при сравнении полученных расчетных данных с результатами натурного или модельного эксперимента принять за основу в дальнейших расчетах наиболее близкие к экспериментальным данные, а также обеспечивает необходимыми исходными данными для проверки различных гипотез, связанных с фазовым состоянием рабочего тела в зазоре пары трения.

Распределение давления рассчитывается по известным формулам, полученным из уравнений Навье – Стокса для осесимметричного течения.

Распределение давления в зазоре переменной толщины считается в программе по следующим формулам:

$$P_{ж} = P_1 + \frac{P_2 - P_1}{\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{rh(r)^3}} \int_{r_1}^r \frac{dr}{rh(r)^3} ,$$

$$P_{г} = \sqrt{P_1^2 + \frac{P_2^2 - P_1^2}{\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{rh(r)^3}} \int_{r_1}^r \frac{dr}{rh(r)^3}} ,$$

где  $P_{ж}$  и  $P_{г}$  – давление жидкости и газа соответственно;

$P_1$  и  $P_2$  – давление жидкости или газа на границах участка;

$h(r)$  – величина зазора, являющаяся функцией радиуса. Аналитическое описание этой функции передается из блока геометрического моделирования;

$r_1, r_2$  – радиусы расположения соответственно начала и конца щели. Расход рабочего тела через уплотнение рассчитывается по формулам:

$$m_{ж} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot (P_2 - P_1)}{6 \cdot \mu \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r \cdot h(r)^3}} , \quad m_{г} = \frac{\pi \cdot (P_2^2 - P_1^2)}{12 \cdot \mu \cdot R \cdot T \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r \cdot h(r)^3}} ,$$



где 
$$m_{\text{ж}} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot (P_2 - P_1)}{6 \cdot \mu \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r \cdot h(r)^3}}$$

$m_{\text{ж}}$ ,  $m_{\text{г}}$  – расход жидкости и газа соответственно;

$\rho$  – плотность жидкости;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости;

$R$  – удельная газовая постоянная;

$T$  – средняя температура в зазоре.

4. **Блок расчета деформаций.** Силовые и температурные деформации рабочих колец определяют, решая термоупругогидродинамическую задачу, в которой тепловые процессы и упругие деформации уплотнительных колец рассматривают совместно с гидродинамикой течения жидкости в зазоре [3].

В общем случае в рамках линейной теории для однородного изотропного упругого тела перемещения от действия силовых и температурных нагрузок описываются уравнениями Ламе. Векторный вариант этих уравнений имеет вид:

$$(\lambda + 2 \cdot \nu) \cdot \text{grad div } \mathbf{w} - \nu \cdot \text{rot rot } \mathbf{w} - (3 \cdot \lambda + 2 \cdot \nu) \cdot \alpha \cdot \text{grad } T = 0,$$

где  $\mathbf{w}$  – вектор перемещения;

$\lambda$ ,  $\nu$  – параметры Ламе;

$\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения;

$T$  – функция, задающая распределение температуры по сечению уплотнительного кольца.

Для оценочных расчетов применяют упрощенные методы, рассматривая отдельно частные виды деформаций уплотнительных колец. В данной модели угол поворота сечения кольца, обусловленный силовыми факторами, рассчитывается по формуле:

$$\psi = \frac{M}{E \cdot I_3},$$

где  $M$  – изгибающий момент относительно оси, проходящей через точку  $Z_c$ ,

$$I_3 = \oint_S \left( \frac{z^2}{r} \right) dS - I_1 \cdot z_c^2$$

$$z_c = \frac{I_2}{I_1} - \text{координата нейтральной точки;}$$

$I_1, I_2$  – геометрические характеристики поперечного сечения.

$$I_1 = \oint_S \frac{dS}{r}, \quad I_2 = \oint_S \frac{z \cdot dS}{r},$$

$S$  – площадь поперечного сечения кольца.

Угол поворота сечения кольца, вызванный неравномерным распределением температуры в радиальном  $r$  и осевом  $z$  направлениях  $T(r, z)$ :

$$\psi = \frac{\alpha}{2 \cdot I_3} \cdot \oint_S [T(r, z) - T_0] \cdot z \cdot dS,$$

где  $T_0$  – минимальная температура кольца.

**5. Менеджер времени.** Этот блок имеет несколько важных функций. Он сопоставляет проходящие через него цикловые потоки информации (изменение геометрии, распределение давления рабочего тела в зазоре, деформации кольца, значение утечки) с динамическими исходными данными, приводя их в соответствие и “накладывая” их на реальную шкалу времени. Таким образом, изменение любого параметра в реальном времени можно проследить, рассматривая его функциональную зависимость от формируемых данным блоком временных меток.

Второй важной функцией данного блока является формирование временных шагов, с которыми производится расчет всех параметров.

Важность этой задачи обусловлена тем, что для сопоставления разнородных расчетов (как, например, расчет уплотнения на различных режимах работы и подбор режимов его эквивалентных испытаний, выявление степени влияния различных параметров на характеристики уплотнения и т. д.) необходимо выработать единые критерии по выбору временных шагов, приводящие к минимальной ошибке. В общем случае значение временного шага может быть величиной переменной. Чтобы избавить конструктора, проектирующего уплотнение, от рутинной

работы по назначению шага и придать этому процессу некоторое единообразие, в данном блоке сделан модуль, формирующий временные метки на основании анализа следующих критериев:

- 1) Точки перегиба. Фактически, это те табличные значения, которые задаются в блоке динамических исходных данных.
- 2) Процент изменения параметров, заданных в динамических исходных данных.
- 3) Время, через которое необходимо поставить временную метку при незначительном изменении динамических исходных данных.
- 4) Минимальная величина износа, при которой необходимо оставить временную метку.

При этом последние три критерия могут оперативно изменяться конструктором в процессе работы в зависимости от необходимой точности расчета. Кроме того, в программу заложен механизм, позволяющий минимизировать ошибку при слишком грубом задании последнего параметра. В этом случае задание временного шага по минимальной величине износа берет на себя компьютер, исходя из предварительно рассчитанной минимальной скорости изнашивания.

Окончательное формирование временной метки производится компьютером при наступлении одного из вышеперечисленных событий.

Алгоритм работы модели следующий:

В блок геометрического моделирования поступают исходные данные (в виде узловых точек) зоны контакта изнашиваемого уплотнительного) кольца. На основании этих данных производится аналитическое описание формы этого кольца. Из блока расчета деформаций поступает значение деформации этого кольца (начальное значение равно нулю). Производится аналитическое описание уплотнительного кольца относительно контртела. Для полученного взаимного положения контактирующих поверхностей рассчитывается величина скорости изнашивания и на основании полученного из блока - менеджера времени значения временного шага рассчитывается величина линейного износа. В соответствии с этой величиной производится пересчет геометрических узлов изнашиваемой детали и описывается новое взаимное положение поверхностей. По полученным данным считается распределение давления в зазоре и величина утечек в данный момент времени. Распределение давления в зазоре меняет баланс сил, и, следовательно, величину контактной нагрузки, что влияет на характеристики изнашивания, результирующую силовую нагрузку и температуру в зоне контакта, т. е. требует пересчета скорости изнашивания и величины деформаций от воздействия силовых и тепловых факторов. Таким образом организуется расчетный цикл.

Значения временных шагов суммируются, выдавая значение времени работы уплотнения.

Созданная имитационная модель ТКУ позволяет рассчитать характеристики уплотнения с использованием различных известных теорий при возможном деформировании рабочих поверхностей, произвести подбор теории для конкретного случая, оценить влияние деформаций на гидродинамические характеристики и ресурс уплотнительного узла. Подобная модель может служить для уточнения результатов расчета ТКУ, создания методик расчета и методик ускоренных испытаний, совершенствования конструкций и оптимизации режимов работы уплотнительных узлов.

Имитационная модель ТКУ может быть хорошим инструментом при создании и доводке уплотнений, особенно в случае совместного использования ее с результатами, полученными при стендовых и натурных испытаниях. Она может быть легко адаптирована к различным турбонасосам.

#### Список литературы

1. Лежин Д.С. Использование плоской геометрической модели деформации и изнашивания контактирующих поверхностей при разработке алгоритма методики расчета ТКУ // "Проблемы и перспективы развития двигателестроения в поволжском регионе" - доклады международной научно – технической конференции. Часть 1. Самара. 1997г. с. 90-95
2. Справочник по триботехнике Т. 1. – Теоретические основы /Под ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 1989. – 398 с.
3. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник/ Под общей ред. Голубева А.И. и Кондакова Л.А. - М.: Машиностроение, 1986. - 464с.